

EIDGENÖSSISCHE TECHNISCHE HOCHSCHULE LAUSANNE
 POLITECNICO FEDERALE DI LOSANNA
 SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY LAUSANNE

DEPARTEMENT DE MICROTECHNIQUE
 INSTITUT DE PRODUCTION MICROTECHNIQUE
 CH - 1015 LAUSANNE

Thomas MAEDER

tél. direct : ++41 21 693.58.23
 tél. secrétariat : ++41 21 693.38.17
 fax : ++41 21 693.38.91
 E-mail : thomas.maeder@epfl.ch



ÉCOLE POLYTECHNIQUE
 FÉDÉRALE DE LAUSANNE

2001-03-02 poutres monoface - offset & TCO - 720-736.docx

Offset et coefficient en température de poutres monofaces en fonction de la procédure de sérigraphie et des terminaisons

Mesure de l'offset et de son coefficient en température des prototypes de capteurs de force brasés monoface. Les poutres sont mesurées en substrat, non ajustées et sans verrage, en fonction de la procédure de sérigraphie et du type de terminaison utilisé pour les résistances, Ag:Pd ou Au.

Thomas Maeder, 2.3.2001

Projets : Capteur de force, brasure métallique.

Mots-Clefs: capteur de force, monoface, sérigraphie, offset, coefficient en température.

Table des matières

1. Introduction	2
2. Expériences	2
3. Résultats	5
4. Conclusions	14

Résumé

La 2^e mouture des capteurs de force monoface a permis une nette amélioration des valeurs de l'offset et du TCO. L'offset est centré vers -35 mV/V et son écart-type est de l'ordre de 20 mV/V . Ces valeurs dépendent peu de la procédure de sérigraphie ou du type de terminaison (Ag:Pd ou Au). La dispersion doit encore être diminuée, car il y a encore des poutres dont l'offset dépasse 0, et qui sont donc non ajustables. Il faudra essayer de sérigraphier parallèlement aux poutres, de sorte à annuler la dispersion latérale le long de la racle.

Les valeurs de TCO sont nettement meilleures avec les terminaisons Au (écart-type $0.6 \mu\text{V/V/K}$) qu'avec les terminaisons Ag:Pd ($1.4 \mu\text{V/V/K}$). Sur Au, on peut, moyennant quelques efforts supplémentaires, garantir une erreur thermique d'env. 3% du span sur une plage d'utilisation de $\pm 25 \text{ K}$.

Avec les terminaisons Au, la procédure de sérigraphie influe peu sur les résultats, et on choisit donc la plus commode (2), qui fait intervenir une re-cuisson des résistances. Avec Ag:Pd, par contre, la dispersion de TCO est un peu plus faible avec une seule cuisson des résistances, et on peut donc choisir une autre procédure (1), qui a cependant le désavantage d'augmenter le nombre de changements de trame et de co-cuissons.

1. Introduction

Le concept de capteur de force à poutre monoface étudié ici est envisagé pour la production à grande échelle et à très bas coût de capteurs¹ : il requiert moins d'opérations de sérigraphie, pas de trous de passage, et une seule sérigraphie de résistances. De plus, la résistance mécanique de la poutre est potentiellement plus élevée en raison de l'absence de sérigraphie sur la partie de la face supérieure sollicitée en traction.

Ce type de poutre nécessite cependant une nouvelle technologie : la brasure sur diélectrique, qui permet aux lignes conductrices du pont de mesure de passer sous la plage de brasure principale. Les premiers essais de sérigraphie ont été réalisés selon la séquence classique de fabrication.

- 1) Sérigraphie du conducteur sur l'autre face (marquage et brasage de la bille).
- 2) Sérigraphie et cuisson du conducteur inférieur (Au fin, ESL 8837).
- 3) Sérigraphie et cuisson (séparée) de 2 couches de diélectrique (ESL 4913).
- 4) Sérigraphie et cuisson du conducteur supérieur (Ag:Pd 3:1, ESL 9635B).
- 5) Sérigraphie et cuisson du renfort de conducteur pour la brasure (Ag:Pd 3:1, ESL 9635B).
- 6) Sérigraphie et cuisson des résistances (10 k Ω , DP 2041).
- 7) Sur une partie des échantillons, sérigraphie et cuisson du verrage (env. 600°C, ESL G-481).

Cette manière de faire pose problème pour la sérigraphie des résistances. En effet, la présence d'un monticule de diélectrique (env. 60 μ m) influence la sérigraphie des résistances, surtout celle des deux résistances qui se trouvent le plus près de lui. En effet, les résistances de mesures sont placées directement sur le substrat et donc 60 μ m plus bas. Les mesures réalisées sur ces premiers échantillons² montrent une dispersion inacceptable de l'offset et du *TCO*.

Il a donc été décidé de modifier la séquence de sérigraphie ci-dessus, afin de faire intervenir celle des résistances plus tôt. Les résistances seront donc plus précises, mais au prix de difficultés supplémentaires de fabrication (co-cuisson, recuisson).

2. Expériences

Substrats

Une série de substrats de 0.8 mm d'épaisseur, en Al₂O₃ 96%, ont été sérigraphiés selon trois variantes de la procédure décrite ci-dessus. Les pâtes sont identiques à celles utilisées dans la séquence de base, sauf les terminaisons des résistances, ou on a aussi essayé Ag:Pd.

Les substrats sont répertoriés au tableau 2-I et les procédures de sérigraphie au tableau 2-II. Dans cette étude, les poutres sont parallèles à la racle lors de la sérigraphie.

Nos substrats	Procédure [mm]	Terminaisons des résistances
01-720 à 01-722	1	ESL 9635B (Ag:Pd 3:1)
01-723 à 01-725	1	ESL 8837 (Au fin)
01-726 à 01-728	2	ESL 9635B (Ag:Pd 3:1)
01-728 à 01-730	2	ESL 8837 (Au fin)
01-731 à 01-732	3	ESL 9635B (Ag:Pd 3:1)
01-733 à 01-735	3	ESL 8837 (Au fin)

Tableau 2-I. Liste des substrats mesurés, triés par épaisseur.

¹ Rapport de diplôme, "Capteur de force pour souris", O. Mathis, 23.2.2001.

² Rapport "Offset et coefficient en température des prototypes de poutres monofaces, non ajustées", T. Maeder, 16.1.2001.

Procédure→ Couche ↓	1	2	3
1	conducteur autre face cuit 850°C	conducteur autre face cuit 850°C	conducteur autre face cuit 850°C
2	conducteur inférieur (terminaisons) cuit 850°C	conducteur inférieur (terminaisons) cuit 850°C	conducteur inférieur (terminaisons) cuit 850°C
3	diélectrique, 1 ^{ère} couche cuit 850°C	résistances séché	résistances séché
4	résistances séché	diélectrique, 1 ^{ère} couche cuit 850°C avec #3	diélectrique, 1 ^{ère} couche cuit 750°C avec #3
5	diélectrique, 2 ^e couche séché	diélectrique, 2 ^e couche séché	diélectrique, 2 ^e couche cuit 750°C
6	conducteur supérieur cuit 850°C avec #4, 5	conducteur supérieur cuit 850°C avec #5	conducteur supérieur cuit 850°C
Nombre de cuissons des résistances	1	2	2x750°C + 1
Diélectrique avant résistances	oui (une couche cuite)	non	non
Réglages de la trame diélectriques	2	1	1

Tableau 2–II. Description et comparaison des variantes de la procédure de sérigraphie.

Cuissons

Les variantes de sérigraphie utilisent différentes stratégies pour limiter le budget thermique de cuisson des résistances, bien que celles-ci soient sérigraphiées assez tôt dans la séquence.

- **Procédure 1.** On admet une couche de diélectrique avant les résistances, en espérant que cela ne gênera pas trop leur sérigraphie. On peut ensuite sérigraphier et co-cuire les résistances, la 2^e couche de diélectrique et le conducteur supérieur. Cette variante est la seule permettant de ne faire qu'une cuisson des résistances, mais leur sérigraphie peut être gênée par la présence de la 1^{ère} couche de diélectrique. De plus, on doit co-cuire jusqu'à 3 couches, dont deux superposées, et on doit interrompre la sérigraphie du diélectrique, ce qui nécessite un nettoyage et un réglage supplémentaire.
- **Procédure 2.** On admet une 2^e cuisson des résistances. Ce faisant, on peut les sérigraphier avant le diélectrique, sérigraphier les deux couches de diélectrique l'une à la suite de l'autre (économise un nettoyage et un réglage), et limiter à 2 le nombre maximal de couches co-cuites.
- **Procédure 3.** Afin de limiter les inconvénients dus au séchage, on effectue des cuissons, mais seule la cuisson finale se fait à la température normale de 850°C. Il faut cependant que la 1^{ère} couche de diélectrique ait atteint une densité minimale, afin qu'elle ne pompe pas le solvant lors de la sérigraphie de la 2^e couche.

Le séchage est fait à l'étuve, env. 15 min à 150°C. Les réglages du four correspondant aux températures de cuisson de 850°C (normale) et 750°C (réduite) sont donnés au tableau 2–III.

Profil	Cuisson nominale	Vitesse de bande [cm/min]	Zone 1 [°C]	Zone 2 [°C]	Zone 3 [°C]	Zone 4 [°C]	Zone 5 [°C]	Zone 6 [°C]
"750"	750°C 10 min	8.67	540	665	766	767	776	790
"850"	850°C 10 min	8.67	540	765	866	867	876	890

Tableau 2–III. Réglages du four Sierratherm pour les différents profils. Le profil "850" est le profil standard de cuisson "30MN_PR".

Mesures

Les mesures ont été réalisées en batch dans le laser LS9000 de l'IPM, en mesurant la tension de sortie du pont à $T_A = 25^\circ\text{C}$ et $T_H = 80^\circ\text{C}$ (support chauffé), tout en alimentant celui-ci avec une tension V_{cc} d'env. 10 V. On donne l'offset à température ambiante s_{OA} et le coefficient en température TCO pour tous les substrats, en fonction de la position de la poutre sur le substrat (fig. 2–1).

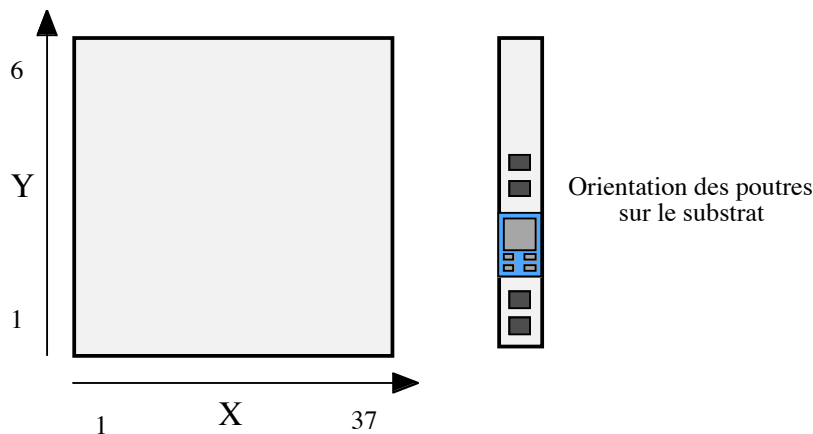


Figure 2–1. Définition des coordonnées des poutres sur le substrat. Le substrat est orienté selon le schéma de la poutre donné à droite, et comporte 6 lignes * 37 colonnes = 222 poutres.

Le signal de sortie s (ratiométrique) est calculé en général comme suit.

$$s = \frac{U^+ - U^-}{V_{cc}}$$

s	signal de sortie (ramené à la tension d'alimentation)
U^+	tension de la sortie positive (par rapport à la terre)
U^-	tension de la sortie négative (par rapport à la terre)
V_{cc}	tension d'alimentation

En l'absence de sollicitation mécanique et à température ambiante $T_A = 25^\circ\text{C}$, on a : $s = s_{OA}$, l'offset à température ambiante. De même, à haute température $T_H = 70^\circ\text{C}$, on a : $s = s_{OH}$. Le calcul du coefficient en température de l'offset TCO est donné ci-dessous.

$$TCO = \frac{s_{OH} - s_{OA}}{T_H - T_A}$$

TCO	coefficient en température de l'offset
s_{OA}, s_{OH}	offsets à températures "ambiante" et "haute"
T_A, T_H	températures "ambiante" et "haute"

Afin de limiter les erreurs sur la mesure de TCO dues aux contraintes dans le substrat lors de la mesure, l'aspiration de la table chauffante a été remplacée par des bandes adhésives, et seuls des substrats relativement épais (0.8 mm) ont été utilisés. Une erreur résiduelle due aux contraintes dans le substrat, contraintes dues à sa fabrication, aux couches, voire aux inhomogénéités thermiques lors de la mesure à chaud, peut cependant subsister.

3. Résultats

Les valeurs de l'offset s_{OA} et de son coefficient en température TCO sont reportées pour 6 substrats, un par variante et par type de terminaisons, aux figures 3–1 à 3–6. Un condensé des résultats (moyenne \pm écart-type de l'offset et de TCO) est donné pour les substrats et les variantes / terminaisons aux figures 3–7 et 3–8. On remarque globalement une amélioration considérable par rapport à l'étude précédente².

Sérigraphie

Du point de vue de la sérigraphie, la variante 3 n'est pas réalisable en l'état, avec le diélectrique ESL 4913. En effet, ce diélectrique densifie insuffisamment à 750°C, ce qui entraîne des difficultés avec la sérigraphie de la 2^e couche ; le solvant est pompé par la 1^{ère} couche, ce qui empêche la 2^e couche de couler et donne une surface rugueuse comportant des trous. Il faudrait donc augmenter la température de cuisson intermédiaire (800°C au lieu de 750°C, par exemple), ou utiliser un diélectrique densifiant à plus basse température. L'augmentation de la température n'est pas souhaitable (budget thermique des résistances) et les diélectriques densifiant à plus basse température sont en général moins stables.

La variante 1 n'entraîne pas de problème particulier ; la présence d'une couche de diélectrique lors de la sérigraphie des résistances est apparemment encore tolérable. Cependant, il faut enlever la trame du diélectrique pour sérigraphier les résistances, et la remettre pour la 2^e couche de diélectrique. La variante 2 est donc la plus commode des 3 à sérigraphier.

Offset

La valeur cible de l'offset pour ce circuit est de –50 mV/V. Les résultats sont centrés sur –36 mV/V, ce qui est assez proche. On rappelle que, sur cette poutre, l'ajustement grossier est unilatéral, de sorte que seules les valeurs négatives de l'offset sont compensables.

La valeur de l'offset et son écart-type dépendent peu de la variante de sérigraphie ou du type de terminaison (fig. 3–8). On remarque juste un écart-type de l'offset très légèrement supérieur avec les terminaisons Au, 21 mV/V contre 16 mV/V pour les terminaisons Ag: Pd.

Bien que ces résultats soient nettement meilleurs que ceux des premiers prototypes, il reste une proportion de quelques % de poutres inutilisables, présentant deux types de défaut.

- 1) **Trous bouchés dans le diélectrique.** Les trous dans le diélectrique sont bouchés, suite à un coulage excessif de la pâte. La trame utilisée (200 mesh) étant grossière, les trous dans le diélectrique gagneraient à être dimensionnés un peu plus généreusement.

2) **Offset > 0.** La dispersion de l'offset est encore un peu trop élevée, probablement en raison de la direction de sérigraphie adoptée : poutre parallèle à la racle. Cette direction est défavorable du point de vue de la dispersion, car que les différentes résistances de la poutre sont sérigraphiées par des portions différentes de la racle. Cette hypothèse est confirmée par les figures 3-1 à 3-6, où les différentes lignes (Y=1 à Y=6) tendent nettement à avoir des offsets moyens différents. Il est donc préférable de sérigraphier avec la poutre parallèle à la direction de sérigraphie ; ainsi, la même portion de la racle parcourt toutes les 4 résistances de la poutre, minimisant la dispersion.

TCO

Contrairement à l'offset, les valeurs de *TCO* montrent une dépendance du type de terminaison des résistances et de la variante de sérigraphie utilisée.

- **Terminaisons.** Les terminaisons Au donnent une dispersion nettement plus faible de *TCO* que Ag:Pd : l'écart-type est env. $0.6 \mu\text{V/V/K}$ contre $1.4 \mu\text{V/V/K}$. En outre, les valeurs avec Au ne sont pas centrées sur 0, mais sur $+0.5 \mu\text{V/V/K}$ (moyenne), ce qui indique que la différente géométrie des résistances actives (–) et passives (+) influe légèrement.
- **Procédure de sérigraphie.** Avec Au, la statistique de *TCO* ne dépend pas significativement de la variante utilisée. En revanche, avec Ag:Pd, la moyenne et l'écart-type dépendent de la variante : $+0.6 \pm 1.0$ (variante 1), $+0.2 \pm 1.6$ (variante 2) et $-0.1 \pm 1.7 \mu\text{V/V/K}$ (variante 3).

On peut donc conclure que la diffusion de l'argent dans les résistances utilisant des terminaisons Ag:Pd influe négativement sur l'appariement du *TCR*, d'où une dispersion plus importante de *TCO*. De plus, cet effet s'aggrave avec les traitements thermiques, ce qui explique la plus grande dispersion observée avec les variantes 2 et 3 (plusieurs cuissons des résistances) par rapport à la variante 1 (une seule cuisson). Ces effets sont absents avec les terminaisons Au.

Dans la mesure du possible, il est donc recommandé d'utiliser Au, ce qui permet en outre d'utiliser la variante 2, la plus commode à sérigraphier. En admettant un span de 1.5 mV/V et un domaine d'utilisation bureautique de $\pm 25 \text{ K}$, on obtient une erreur d'env. $\pm 3\%$ avec un *TCO* dans $\pm 2 \mu\text{V/V/K}$.

Il faut noter que, dans notre cas, les résistances sont très sensibles à la diffusion des terminaisons et aux effets de bord de sérigraphie en raison de leur très faible longueur, de l'ordre de 0.6 mm . Sur des résistances de grande taille, on obtient, même avec Ag:Pd, des valeurs de *TCO* de l'ordre de $0.2 \mu\text{V/V/K}$ en valeur absolue³.

³ Rapport "Mesures sur prototypes de cellules de force Tractel", T. Maeder, 30.10.2000.

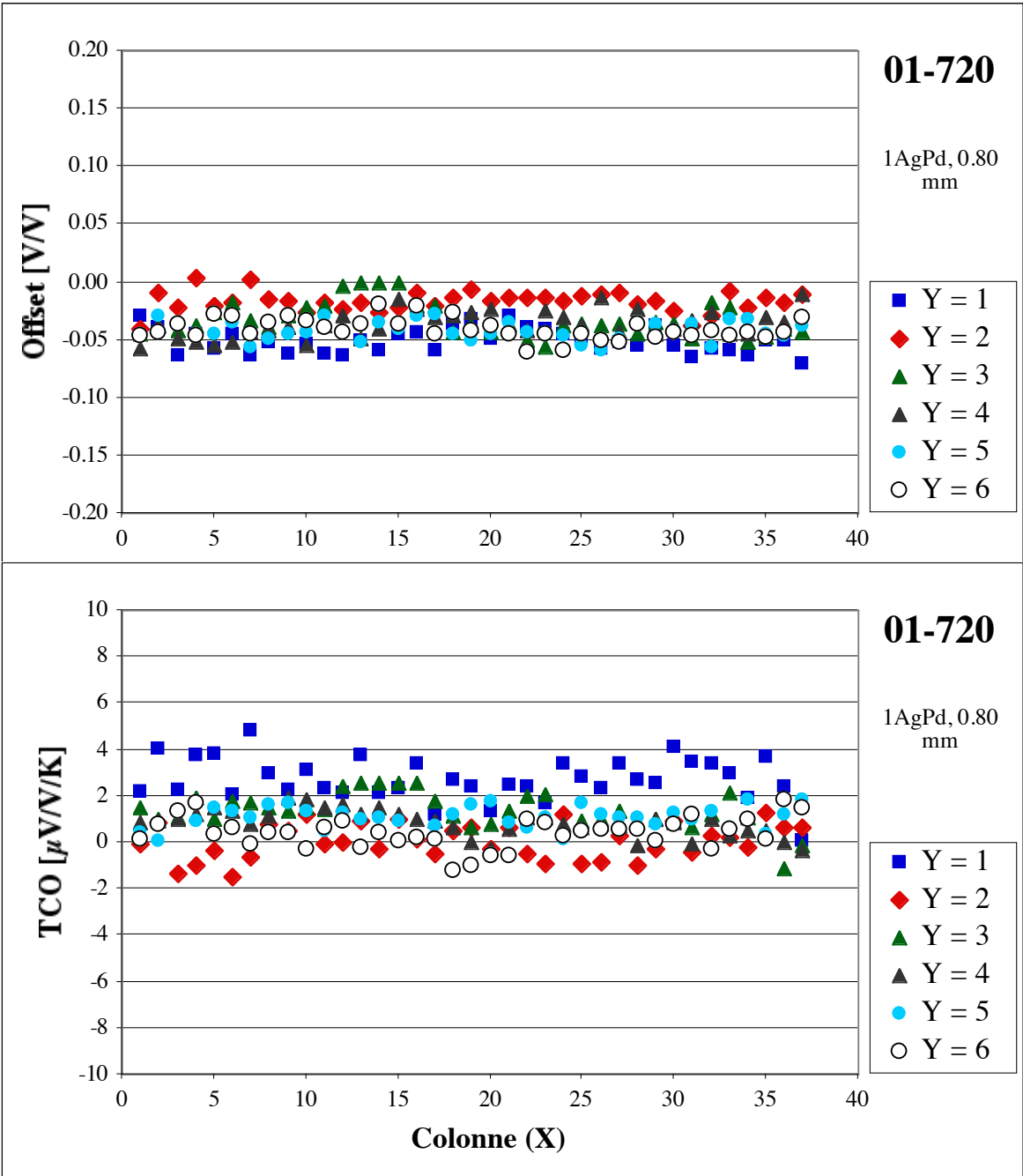


Figure 3-1. Offset et TCO sur le substrat 01-720 (variante 1 AgPd), en fonction de la position.

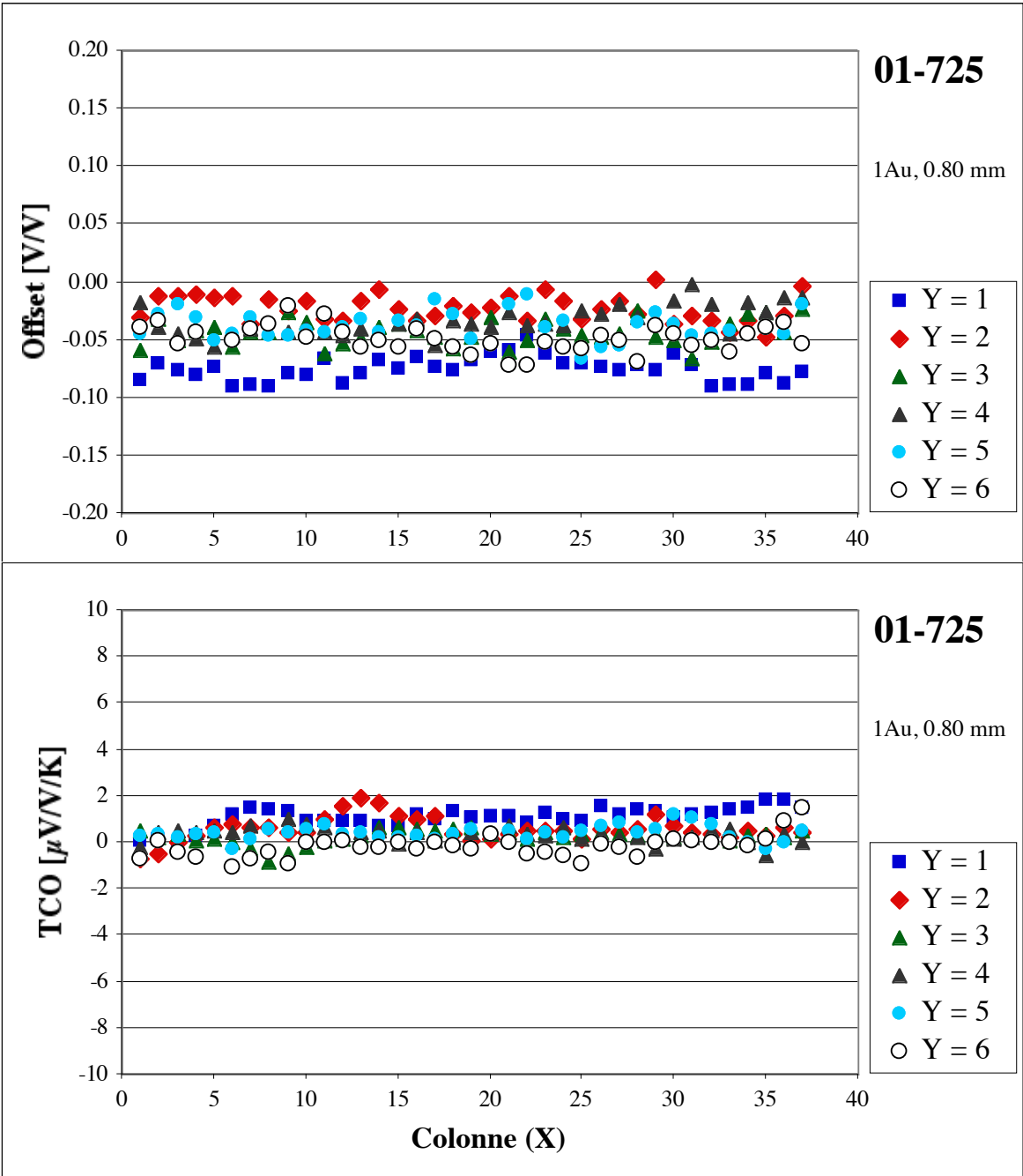


Figure 3-2. Offset et TCO sur le substrat 01-725 (variante 1 Au), en fonction de la position.

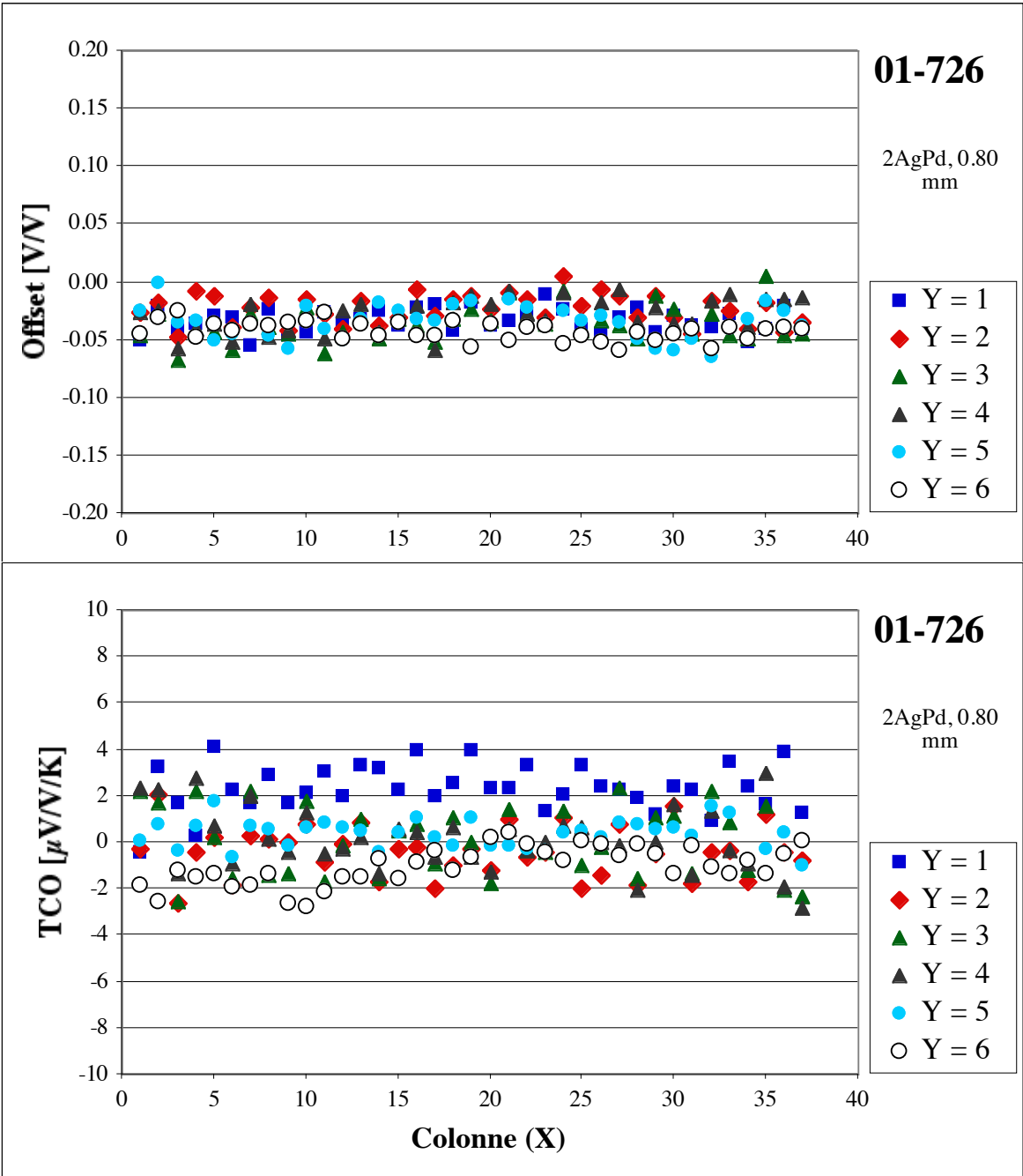


Figure 3–3. Offset et *TCO* sur le substrat 01–726 (variante 2 AgPd), en fonction de la position.

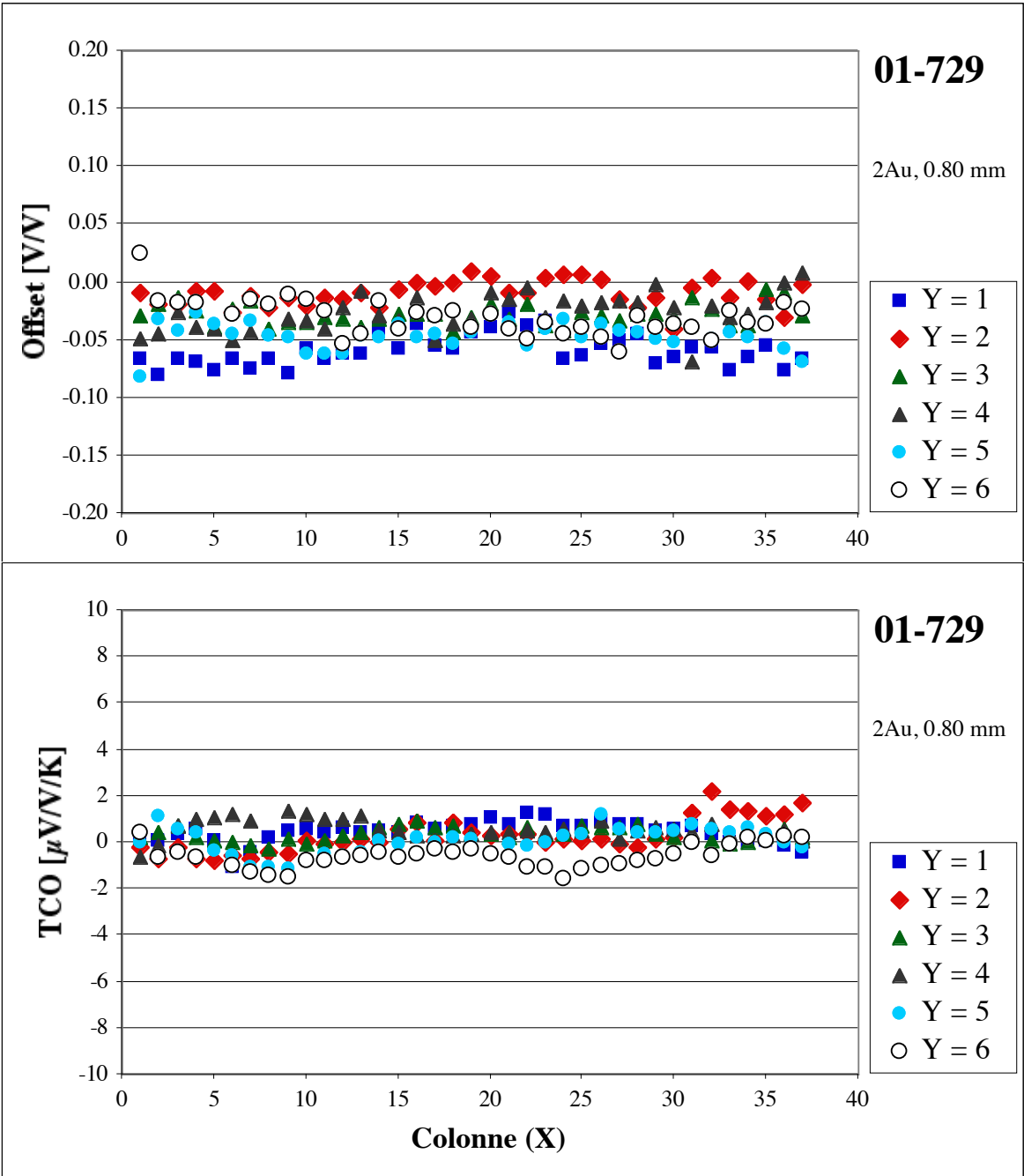


Figure 3–4. Offset et *TCO* sur le substrat 01–729 (variante 2 Au), en fonction de la position.

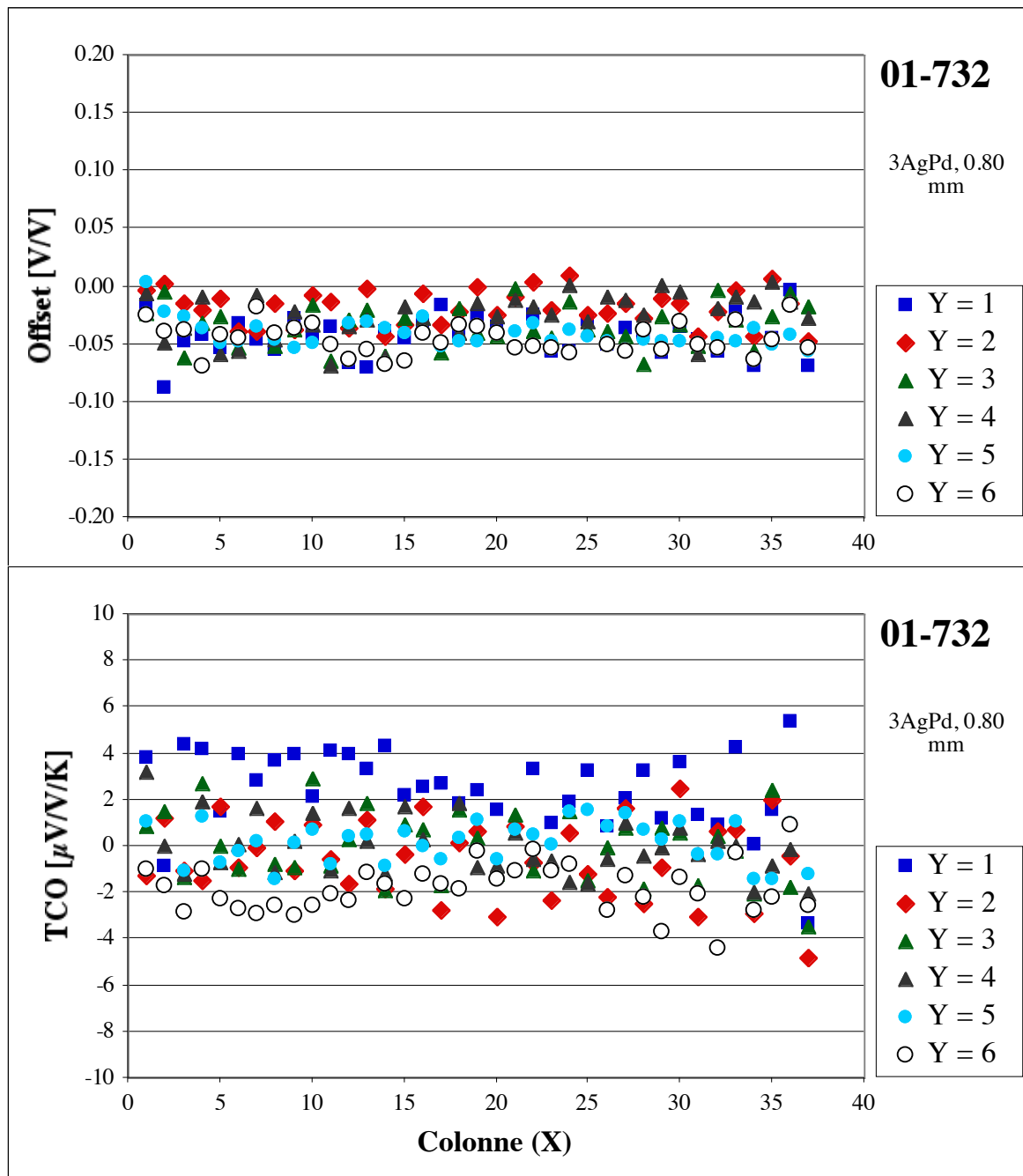


Figure 3-5. Offset et TCO sur le substrat 01-732 (variante 3 AgPd), en fonction de la position.

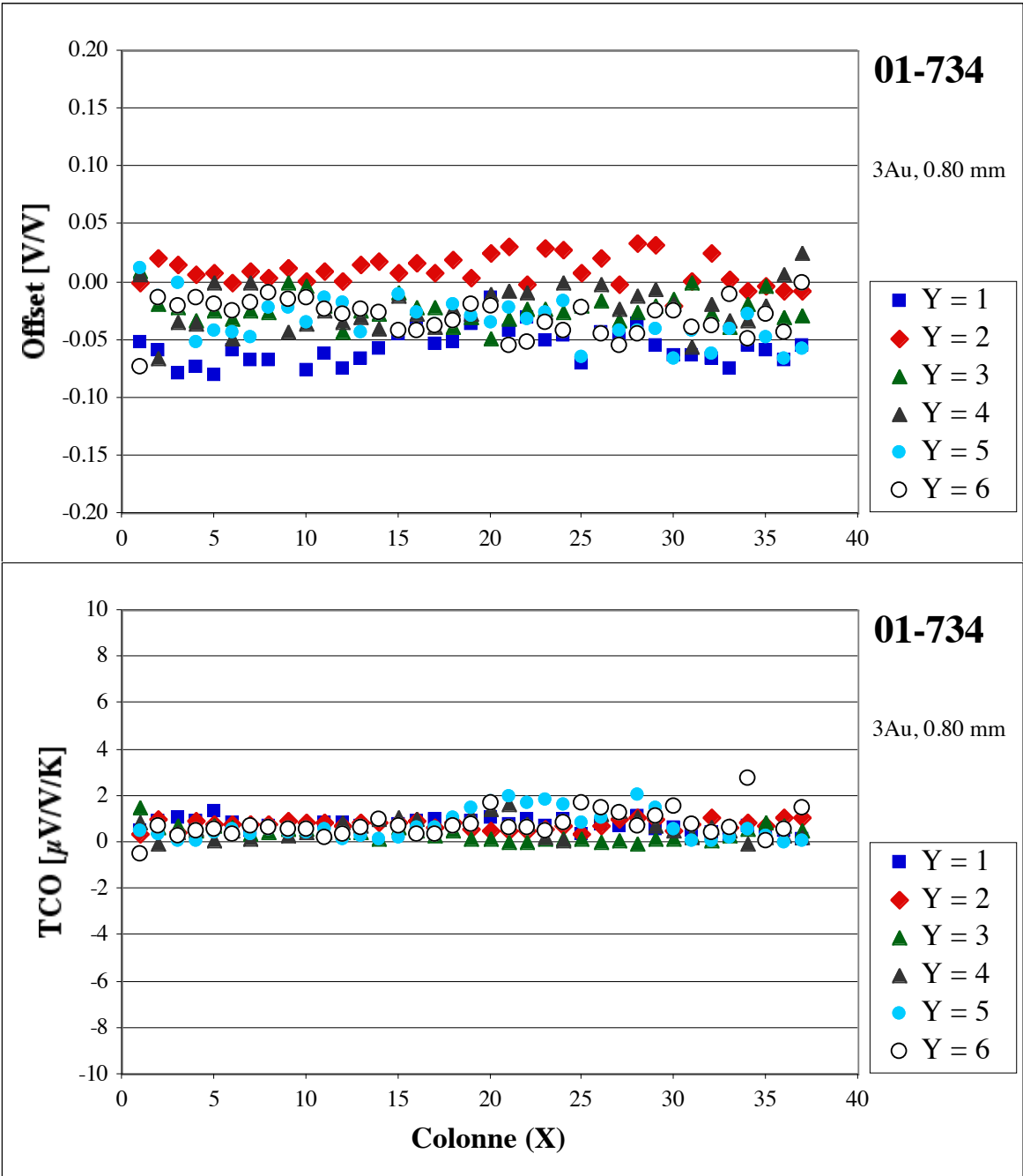


Figure 3–6. Offset et TCO sur le substrat 01–734 (variante 3 Au), en fonction de la position.

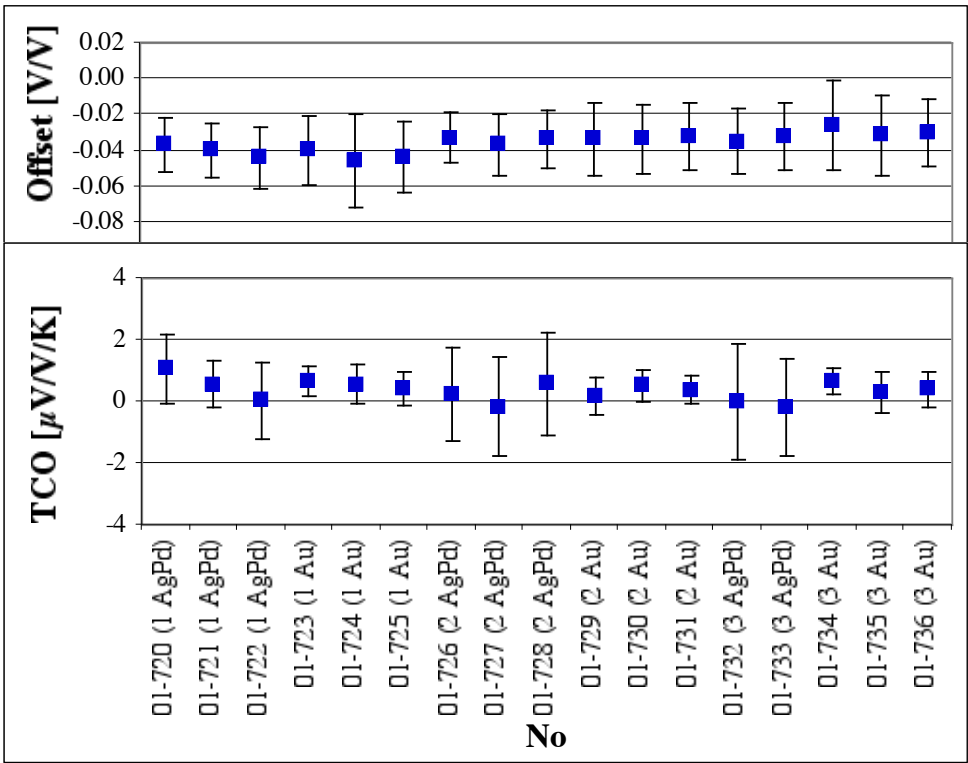


Figure 3-7. Offset et TCO (moyenne \pm écart-type par substrat), en fonction du substrat.

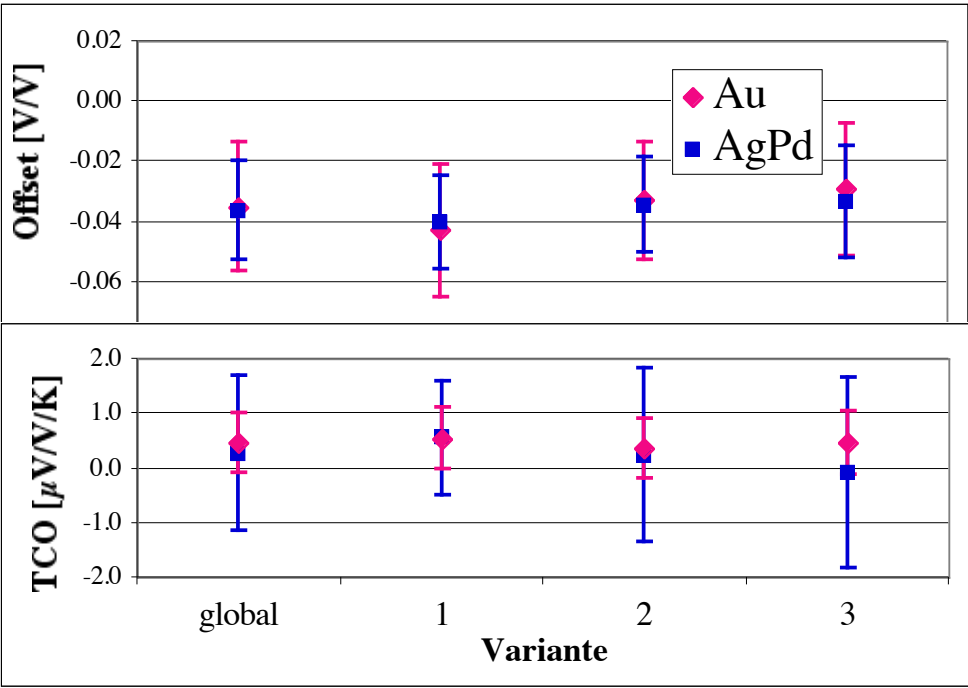


Figure 3-8. Offset et TCO (moyenne \pm écart-type), en fonction de la procédure et des terminaisons.

4. Conclusions

Cette étude avait pour but de trouver une procédure permettant de sérigraphier correctement les résistances, ainsi que de déterminer l'influence des terminaisons, Ag:Pd 3:1 ou Au, sur l'ajustement de l'offset et du *TCO*.

L'ajustement de l'offset dépend assez peu du type de terminaison ou de la procédure de sérigraphie. On remarque une dispersion de l'offset légèrement plus faible avec Ag:Pd qu'avec Au, mais la plus grande contribution à cette dispersion est probablement la sérigraphie selon la mauvaise direction, avec la racle parallèle aux poutres. Un changement (direction de sérigraphie parallèle aux poutres) est donc recommandé.

Le *TCO* présente une dispersion nettement plus faible avec Au qu'avec Ag:Pd, centrée sur une valeur légèrement positive et indépendante de la procédure de sérigraphie utilisée. Pour beaucoup d'applications, un ajustement du *TCO* serait superflu, à moins que l'ajustement de l'offset et le verrage ne viennent dégrader ces résultats...

En revanche, la dispersion de *TCO* dépend de la procédure de sérigraphie avec Ag:Pd. La procédure 1, qui ne fait intervenir qu'une cuisson des résistances, donne une dispersion plus faible que les procédures 2 et 3.

La moyenne légèrement positive du *TCO* est probablement due aux tailles légèrement différentes des résistances, ce qui entraîne des effets de bord (sérigraphie, diffusion avec les terminaisons) différents. On peut théoriquement influencer cette moyenne, et donc centrer la dispersion autour de 0, en dilatant ou contractant légèrement une des résistances ajustables, dans les deux directions afin de conserver la même valeur.

Pour les études futures (résistances sur diélectrique, 1^{ère} phase⁴), la procédure 2 est à recommander, car elle présente le meilleur compromis entre facilité et résultats. Il est théoriquement aussi possible d'utiliser la procédure 1 (résultats identiques avec Au, un peu meilleurs avec Ag:Pd), mais celle-ci implique un changement de trame supplémentaire et un nombre de co-cuissons plus élevé, ce qui est moins commode. Quant à la procédure 3, elle est inutilisable telle quelle avec le diélectrique ESL 4913, car celui-ci densifie insuffisamment à 750°C, ce qui gêne la sérigraphie de la 2^e couche.

⁴ Plan d'expériences "Programme d'optimisation des poutres monofaces", T. Maeder, 22.1.2001.